

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220652

基于 Petri 网基础标识的分散式故障诊断方法研究

葛瑜¹, 王晓静², 朱光辉^{1,3}, 王红艳¹

(1. 许昌学院电气与机械工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 河南轻工职业学院机电工程系, 河南 郑州 450008;
3. 澳门科技大学系统工程研究所, 澳门 999078)

摘要: 电子信息技术的高速发展催生了很多包含众多组件的复杂系统, 故障诊断技术致力于及时、准确地检测这些系统中的故障, 从而为快速恢复系统功能提供重要支撑。基于 Petri 网数学模型提出分散式的故障诊断方法, 分别针对分散式架构中的诊断站点和协调者设计故障诊断算法, 并提出相应的诊断协议。站点诊断算法基于 Petri 网基础标识和基础向量构建, 避免穷举所有与观测序列一致的变迁序列, 有效提高诊断效率。提出的分散式诊断方法比传统的集中式方法具有更高的计算效率和更好的稳定性。相对于其他已存在的分散式方法, 该方法具有更小的 Petri 网结构假设限制和更广的适用范围。

关键词: Petri 网; 故障诊断; 分散式结构; 离散事件系统

Decentralized fault diagnosis of labeled Petri nets by basis markings

GE Yu¹, WANG Xiaojing², ZHU Guanghui^{1,3}, WANG Hongyan¹

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China; 2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Light Industry Vocational College, Zhengzhou 450008, China;
3. Institute of Systems Engineering, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China)

Abstract: The rapid development of electronic information technology has spawned many complex systems which include a considerable number of components. Fault diagnosis aims to accurately detect faults in these systems in a timely manner, thus providing important support for the rapid recovery of system functions. This paper proposes a decentralized fault diagnosis approach based on Petri nets. Two algorithms for each diagnosis site and the coordinator in the decentralized architecture are provided. In addition, a diagnosis protocol used between diagnosis sites and the coordinator is developed. The diagnosis algorithm of each site is constructed based on Petri net basis markings and vectors. Thus, exhaustive enumeration of all transition sequences consistent with the observed label sequence is avoided, leading to better computational efficiency. The proposed decentralized diagnosis approach enjoys higher computational efficiency and better stability than the traditional centralized methods. Compared with existing approaches, that described here requires fewer assumptions on the structure of a net system and has broader applicability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62103349).

Key words: Petri net; fault diagnosis; decentralized structure; discrete event system

0 引言

随着信息技术的飞速发展, 涌现了很多组件繁多、功能复杂的电子系统, 如高压输电系统、智能交通系统、分布式软件系统等, 这些系统的复杂性增大了故障发生的风险。故障扰乱系统原定的运行

流程, 降低生产效率, 甚至导致发生重大生产事故。故障诊断致力于及时、准确地识别故障的数量和位置, 从而为快速恢复系统正常功能提供重要支撑。

为给故障诊断提供理论指导和定性分析, 许多基于模型的故障诊断方法被提出^[1-4]。最近几十年, 基于离散事件系统(Discrete Event System)模型的故障诊断方法被广泛研究, 形成了丰富的理论成果^[5-14]。Petri 网是一种典型的离散事件系统模型, 具有清晰的图形化描述和准确的数学定义, 许多现实系统可

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62103349); 河南省高等学校重点科研项目资助(21B470009)

以抽象建模为 Petri 网模型。本文基于 Petri 网模型提出一种分散式的(decentralized)故障诊断方法。

文献[14]首次提出面向离散事件系统的故障诊断方法,使用自动机建模系统,并用不可观事件表示系统故障,通过构建诊断器判定故障的可诊断性并进行故障诊断。为了缓和自动机建模中的状态爆炸问题,许多文献基于 Petri 网模型研究故障诊断问题。

文献[15]通过监测与 P 不变量关联的库所中的托肯数从而诊断核力发电厂中的故障。文献[16]扩展文献[14]中的自动机方法,通过构建一个 Petri 网诊断器进行加标 Petri 网的在线故障诊断。文献[17-18]基于 Petri 网模型提出高效的电力系统故障诊断方法。为了进一步提高 Petri 网模型下的故障诊断效率,提出了许多基于基础标识或线性规划的方法。

文献[19]首次提出 Petri 网基础标识的概念,并在此基础上设计 Petri 网的故障诊断算法,避免了穷举与观测序列一致的所有变迁序列,提高了诊断效率。之后,许多基于基础标识的诊断方法被进一步研究和应用。文献[20-21]基于基础标识提出基础可达图的概念,基础可达图避免了穷举所有可达结点,有效提高诊断效率。文献[22-24]基于 Petri 网状态等式设计用于故障诊断的整数线性规划模型,通过为规划模型分配不同的目标函数计算故障诊断结果。

上述诊断方法均基于集中式结构进行设计,只有一台计算设备用于故障诊断,当系统规模较大时,此种结构不能保证诊断的及时性和有效性。为了缓和此种情况,提出一些基于分散式结构的故障诊断方法。文献[25]基于基础标识提出加标 Petri 网的分散式诊断方法,设计三种不同的诊断协议,并依次提出相应的诊断算法。文献[26]扩展文献[22]中的方法到分散式场景,分散式场景中的每个站点通过求解不同的整数线性规划问题计算诊断结果。

本文基于加标 Petri 网模型提出分散式的故障诊断方法,分散式结构包含多台具有相同计算能力的诊断站点,站点并行运行,各自计算其诊断结果,然后由协调者收集各站点的诊断数据并做出最终诊断。本文提出的分散式诊断方法利用多台诊断设备对系统进行并行诊断,保证了复杂系统故障诊断的及时性和有效性。主要贡献如下:

(1) 提出的分散式诊断方法相对于传统集中式方法^[3,19-23]具有更高的计算效率和稳定性;

(2) 相比其他分散式方法^[25-26],提出的方法不需要遵守特定的假设限制,扩大了方法的适用范围。

1 基本定义

一个 Petri 网 N 是一个二分图,数学上表示为一个

四元组 $N = (P, T, Pre, Post)$, 其中 P 是 m 个库所的集合, T 是 n 个变迁的集合, Pre 和 $Post$ 是表示库所和变迁连接关系的两个矩阵。矩阵 $C = Post - Pre$ 称为网 N 的关联矩阵。变迁 t 的输入和输出库所集分别记为 $\cdot t = \{p \in P \mid Pre(p, t) > 0\}$ 和 $t \cdot = \{p \in P \mid Post(p, t) > 0\}$ 。一个不包含任何有向环的 Petri 网称为无环网。

一个 Petri 网标识表示为映射 $M: P \rightarrow \mathbb{N}$, 其中 $M(p)$ 表示库所 p 中的托肯数。 $\langle N, M_0 \rangle$ 称为初始化的网系统, 其中 M_0 称为网 N 的初始标识。对于一个变迁 t , 如果每一个库所 $p \in \cdot t$ 都满足 $M(p) \geq Pre(p, t)$, 则称变迁 t 在标识 M 下使能。在标识 M 下, 触发变迁序列 $\sigma \in T^*$, 使系统到达一个新的标识 M_α , 其值可以通过式(1)计算。

$$M_\alpha = M + C \pi(\sigma) \quad (1)$$

其中, 函数 $\pi: T^* \rightarrow \mathbb{N}^n$ 表示每个变迁 $t \in T$ 在序列 σ 中发生的次数。所有在初始标识 M_0 使能的变迁序列的集合记为

$$L(N, M_0) = \{\sigma \in T^* \mid M_0[\sigma]\}$$

四元组 $\langle N, M_0, E, l \rangle$ 称为加标 Petri 网, 其中 E 表示一个字符集, $l: T \rightarrow E \cup \{\varepsilon\}$ 为标签函数。变迁集合 $T_o = \{t \in T \mid l(t) \neq \varepsilon\}$ 和 $T_u = \{t \in T \mid l(t) = \varepsilon\}$ 分别表示可观变迁的集合和不可观变迁的集合, 它们的基数分别用 n_o 和 n_u 表示。具有相同标签 $e \in E$ 的变迁的集合记为 $T_e = \{t \in T \mid l(t) = e\}$ 。

不可观变迁集 T_u 进一步划分为正常的不可观变迁集 T_{reg} 和故障变迁集 T_f , 即 $T_u = T_{reg} \cup T_f$ 。仿照函数 π 的定义, 分别针对可观变迁序列 $\sigma_o \in T_o^*$ 和不可观变迁序列 $\sigma_u \in T_u^*$ 定义两个函数 $\pi_o: T_o^* \rightarrow \mathbb{N}^{n_o}$ 和 $\pi_u: T_u^* \rightarrow \mathbb{N}^{n_u}$ 。在一个加标 Petri 网 $\langle N, M_0, E, l \rangle$ 中, 所有观测字的集合定义为

$$L^E(N, M_0) = \{\omega \in E^* \mid \sigma \in L(N, M_0), \omega = l(\sigma)\}$$

所有与观测字 $\omega \in L^E(N, M_0)$ 一致的变迁序列的集合定义为

$$C(\omega) = \{\sigma \in T^* \mid \sigma \in L(N, M_0), l(\sigma) = \omega\}$$

网 N 的可观子网和不可观子网分别定义为 $N_o = (P, T_o, Pre_o, Post_o)$ 和 $N_u = (P, T_u, Pre_u, Post_u)$, 它们的关联矩阵分别表示为 $C_o = Post_o - Pre_o$ 和 $C_u = Post_u - Pre_u$ 。

2 问题陈述

故障诊断依据观测到的系统输出推断系统中的故障数量和位置。依据不同的诊断架构, 故障诊

断分为集中式诊断和分散式诊断。集中式诊断使用单个诊断器，诊断算法更易设计和实施，但由于单个诊断器计算能力有限，不适用于大规模系统。分散式诊断包含多个计算能力相同的诊断器，并行计算诊断结果，有效提高大规模系统的诊断效率，保证诊断的及时性。

2.1 问题场景

本文基于加标 Petri 网数学模型，提出一种分散式的故障诊断方法，适用于如图 1 所示的应用场景。

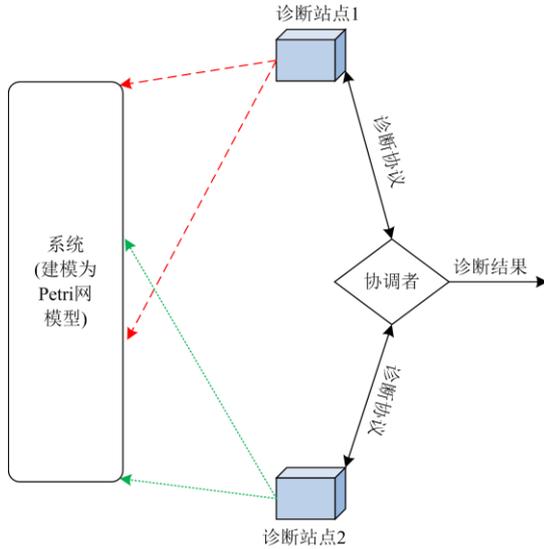


图 1 应用场景

Fig. 1 Usage scenario

图 1 所示的应用场景包含三部分主体，分别为：

(1) 系统。建模为加标 Petri 网数学模型，其输出表现为一串标签序列。

(2) 诊断站点 1 和 2。分别可以观测到一部分系统输出(观测区域可能重叠)，它们合作观测整个系统；每个站点具备较强的计算能力，依据观测数据计算各自的诊断结果，并发送诊断结果到协调者。

(3) 协调者。具备较弱的计算能力，通过诊断协议与诊断站点交互数据，并根据站点的局部诊断结果计算最终的全局诊断结果。

2.2 问题定义

在 Petri 网模型下，分散式诊断框架如图 2 所示，上述问题场景中的系统、诊断站点和协调者分别对应于下述(1)、(2)、(3)。

(1) 系统表示为加标 Petri 网 $\langle N, \mathbf{M}_0, E, \ell \rangle$ ，其运行轨迹表示为变迁序列 $\sigma \in T^*$ ；

(2) 共有 h 个诊断站点，每个站点 i 定义各自的标签函数 l_i ，并用 $\omega_i = l_i(\sigma)$ 表示其观测字，其诊断器 Φ_i 依据观测字 ω_i 计算诊断结果；

(3) 协调者依据局部诊断结果 Φ_1, \dots, Φ_h ，计算并输出全局诊断结果 $\bar{\Delta}$ 。

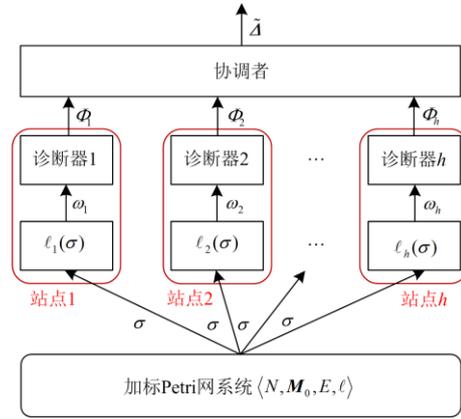


图 2 分散式诊断框架

Fig. 2 Decentralized structure for fault diagnosis

每个站点 i ($i=1, \dots, h$) 可以观测到加标 Petri 网系统 $\langle N, \mathbf{M}_0, E, \ell \rangle$ 的一部分，其标签集定义为 $E_i \subseteq E$ (满足 $E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_h = E$)，对应的标签函数定义为 $l_i : T \rightarrow E_i \cup \{\varepsilon\}$ ，使得每个变迁 $t \in T$ 满足：

- (1) 若 $l(t) \in E_i$ ，则 $l_i(t) = l(t)$ ；
- (2) 否则，令 $l_i(t) = \varepsilon$ 。

站点 i 表示为 Petri 网系统 $\langle N, \mathbf{M}_0, E_i, l_i \rangle$ ，并仿照函数 1 的定义，扩展标签函数 l_i 到变迁序列 $\sigma \in T^*$ 。

假设 1：站点 i 的不可观子网 N_{u_i} 是无环网。

假设 1 是 Petri 网故障诊断方法经常遵循的假设，主要作用为：(1) 防止系统运行在一个由不可观变迁组成的环里，从而导致站点永远观测不到系统输出；(2) 为 Petri 网在不可观子网中的可达性提供充要条件。用于表示站点 i 诊断结果的诊断器定义如下所述。

定义 1：给定运行轨迹 $\sigma \in T^*$ ，站点 $\langle N, \mathbf{M}_0, E_i, l_i \rangle$ 观测到的观测字为 $\omega = l_i(\sigma)$ ，站点诊断器 $\Phi_i : E_i^* \times T_f \rightarrow \{0, 1, 2\}$ 定义为

- (1) 若对于所有变迁序列 $\sigma \in C_i(\omega)$ ，故障变迁 $f \in T_f$ 满足条件 $f \notin \sigma$ ，则 $\Phi_i(\omega, f) = 0$ ；
- (2) 若存在变迁序列 $\sigma_1, \sigma_2 \in C_i(\omega)$ ，使故障变迁 $f \in T_f$ 满足条件 $f \in \sigma_1$ 和 $f \notin \sigma_2$ ，则 $\Phi_i(\omega, f) = 1$ ；
- (3) 若对于所有变迁序列 $\sigma \in C_i(\omega)$ ，故障变迁 $f \in T_f$ 满足条件 $f \in \sigma$ ，则 $\Phi_i(\omega, f) = 2$ 。

在定义 1 中， $\Phi_i(\omega, f) = 0$ 表示故障 f 未发生，

$\Phi_i(\omega, f) = 1$ 表示故障 f 可能已经发生, $\Phi_i(\omega, f) = 2$ 表示故障 f 肯定已经发生。基于以上叙述, 本文要解决的问题形式化定义如下。

问题 1: 给定一个加标 Petri 网系统 $\langle N, \mathbf{M}_0, E, 1 \rangle$ 及其运行轨迹 $\sigma \in L(N, \mathbf{M}_0)$, 诊断站点 i ($i = 1, L, h$) 依据观测字 $\omega_i = 1_i(\sigma)$ 计算每个故障 $f \in T_f$ 的诊断结果 $\Phi_i(\omega_i, f)$, 并把结果发送给协调者, 协调者依据诊断协议和局部诊断结果 $\Phi_1(\omega_1, f), \dots, \Phi_h(\omega_h, f)$ 计算全局诊断结果。

3 问题求解

3.1 站点诊断算法

定义 1 虽然给出了诊断站点求解 $\Phi_i(\omega_i, f)$ 的方法, 但需穷举所有与观测字 ω_i 一致的变迁序列, 即集合 $C_i(\omega_i)$ 。因此, 基于定义 1 的故障诊断策略效率低下, 不适用于大规模系统。文献[16]提出基础标识和基础向量的概念, 本节基于这些概念提出高效的站点诊断算法, 避免穷举集合 $C_i(\omega_i)$, 从而提高诊断效率。

定义 2: 给定诊断站点 $\langle N, \mathbf{M}_0, E, 1_i \rangle$ 的一个标识 $\mathbf{M} \in R(N, \mathbf{M}_0)$ 和一个可观变迁 $t \in T_{o_i}$, 在标识 \mathbf{M} 下, 使变迁 t 使能的不可观变迁序列集定义为

$$\Sigma_i(\mathbf{M}, t) = \{\sigma_u \in T_u^* \mid \mathbf{M}[\sigma_u] \mathbf{M}', \mathbf{M}' \geq \text{Pre}_i(\cdot, t)\}$$

其对应的触发向量集定义为

$$Y_i(\mathbf{M}, t) = \{\mathbf{y} \in \mathbb{N}^{n_u} \mid \exists \sigma_u \in \Sigma(\mathbf{M}, t) : \mathbf{y} = \pi_{u_i}(\sigma_u)\}$$

最小触发向量集定义为

$$Y_{\min}^i(\mathbf{M}, t) = \left\{ \mathbf{y} \in \mathbb{N}^{n_u} \mid \mathbf{y} \in Y_i(\mathbf{M}, t), \right. \\ \left. \exists \mathbf{y}' \in Y_i(\mathbf{M}, t) : \mathbf{y}' \leq \mathbf{y} \right\}$$

基于集合 $Y_{\min}^i(\mathbf{M}, t)$, 基础标识和基础向量定义如下。

定义 3: 给定诊断站点 $\langle N, \mathbf{M}_0, E, 1_i \rangle$ 的一个观测字 $\omega \in T_{o_i}^*$ 和一个可观变迁 $t \in T_{o_i}$, 对应于观测字 ωt 的基础标识和基础向量集递归地定义为

$$(1) \mathbf{M}(\varepsilon) = \{(\mathbf{M}_0, \mathbf{0})\}$$

$$(2) \mathbf{M}^{\omega}(\omega t) = \left\{ \begin{array}{l} (\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathcal{M} \times \mathbb{N}^{n_u} \mid \exists (\mathbf{M}', \mathbf{y}') \in \\ \mathbf{M}(\omega), \exists \mathbf{y}'' \in Y_{\min}^i(\mathbf{M}', t) : \mathbf{M} = \\ \mathbf{M}' + \mathbf{C}_{u_i} \cdot \mathbf{y}'' + \mathbf{C}(\cdot, t), \mathbf{y} = \mathbf{y}' + \mathbf{y}'' \end{array} \right\}$$

$$(3) \mathbf{M}(\omega t) = \left\{ \begin{array}{l} (\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}^{\omega}(\omega t) \mid \exists (\mathbf{M}', \mathbf{y}') \in \\ \mathbf{M}^{\omega}(\omega t) : \mathbf{y}' \leq \mathbf{y} \end{array} \right\}$$

其中, 对于每一对元素 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}(\omega t)$, \mathbf{M} 称为基础标识, \mathbf{y} 称为基础向量。

命题 1^[20]: 给定诊断站点 $\langle N, \mathbf{M}_0, E, 1_i \rangle$, 如果存在变迁序列 $\sigma \in T^*$ 满足条件 $\mathbf{M}_0[\sigma] \mathbf{M}$, 则存在基础标识 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}_i(\omega)$ 和序列 $\sigma \in T_{u_i}^*$ 满足条件 $\mathbf{M}[\sigma] \mathbf{M}'$ 和 $\mathbf{y}' = \mathbf{y} + \pi(\sigma)$, 其中 $\omega = \tau_i(\sigma)$, $\mathbf{y}' = \pi(\sigma)$ 。

定理 1: 给定一个诊断站点 $\langle N, \mathbf{M}_0, E, 1_i \rangle$ 的可观变迁序列 $\omega \in T_{o_i}^*$ 和一个故障变迁 $f \in T$, 以下诊断结果成立。

- (1) 若所有 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}(\omega)$ 满足条件 $\mathbf{y}(f) \geq 1$, 则 $\Phi_i(\omega, f) = 2$;
 - (2) 若存在 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}), (\mathbf{M}', \mathbf{y}') \in \mathbf{M}(\omega)$ 满足条件 $\mathbf{y}(f) \geq 1$ 和 $\mathbf{y}'(f) = 0$, 则 $\Phi_i(\omega, f) = 1$;
 - (3) 若所有 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}(\omega)$ 满足 $\mathbf{y}(f) \geq 0$ 且规划 $\mathbf{P}(\mathbf{M}, f)$ 无解, 则 $\Phi_i(\omega, f) = 0$;
 - (4) 若所有 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}(\omega)$ 满足 $\mathbf{y}(f) \geq 0$ 且存在 $(\mathbf{M}', \mathbf{y}') \in \mathbf{M}(\omega)$ 使得规划 $\mathbf{P}(\mathbf{M}', \mathbf{y}')$ 有解, 则 $\Phi_i(\omega, f) = 1$ 。
- 其中,

$$\mathbf{P}(\mathbf{M}, f) = \begin{cases} \mathbf{M} + \mathbf{C}_{u_i} \mathbf{z} \geq \mathbf{0} \\ \mathbf{z}(f) \geq 1 \\ \mathbf{z} \in \mathbb{N}^{n_u} \end{cases}$$

证明: 在结果(1)中, 如果所有 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}(\omega)$ 满足 $\mathbf{y}(f) \geq 1$, 依据基础标识和基础向量的定义, 故障 f 在从 \mathbf{M}_0 到 \mathbf{M} 的所有轨迹中至少发生了一次, 因此依据诊断函数 Φ_i 的定义, $\Phi_i(\omega, f) = 2$ 成立。应用相似的推理, 在结果(2)中, f 在从 \mathbf{M}_0 到 \mathbf{M} 的轨迹中至少发生了一次, 但在从 \mathbf{M}_0 到 \mathbf{M}' 的所有轨迹中未发生, 也就是说, 存在变迁序列 $\sigma_1, \sigma_2 \in C_i(\omega)$ 满足条件 $f \in \sigma_1$ 和 $f \notin \sigma_2$, 依据定义 1, $\Phi_i(\omega, f) = 1$ 成立。在结果(3)中, 如果所有 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}(\omega)$ 满足 $\mathbf{y}(f) \geq 0$, 则故障 f 在所有从 \mathbf{M}_0 到 \mathbf{M} 的轨迹中未发生。为了进一步确认 f 是否在 \mathbf{M} 之后的轨迹中发生, 需要求解规划 $\mathbf{P}(\mathbf{M}, f)$ 。依据命题 1, 如果 $\mathbf{P}(\mathbf{M}, f)$ 无解, 则 f 在 \mathbf{M} 之后的轨迹中未发生。综上, f 在所有与 ω 一致的序列中未发生。因此, 依据定义 1, $\Phi_i(\omega, f) = 0$ 成立。在结果(4)中, 规划 $\mathbf{P}(\mathbf{M}, f)$ 有解表明 f 必定在标识 \mathbf{M} 之后的不可观变迁序列中发生, 因此 $\Phi_i(\omega, f) = 1$ 成立。证明完毕。

诊断站点 i 的诊断流程如图 3 所示。依据算法流程图、定义 3 和定理 1 设计算法 1。算法 1 的(2)至(10)行递归计算集合 $\mathbf{M}(\omega)$, (11)至(20)行依据定

理 1 计算每个故障 $f_j \in T_f$ 的诊断结果, 并把诊断结果保存在一个列向量 \mathbf{Q} 中, 即 $\mathbf{Q}(j) = \Phi_j(\omega, f_j)$, $j=1, L, r$ 。依据定理 1, 计算 $\Phi_j(\omega, f_j)$ 时共有四种

情况, 分别为行(12)、(14)、(16)和(18)。这四种情况是互斥的, 只要满足其中一种情况, 其他三种情况就不需要再验证。

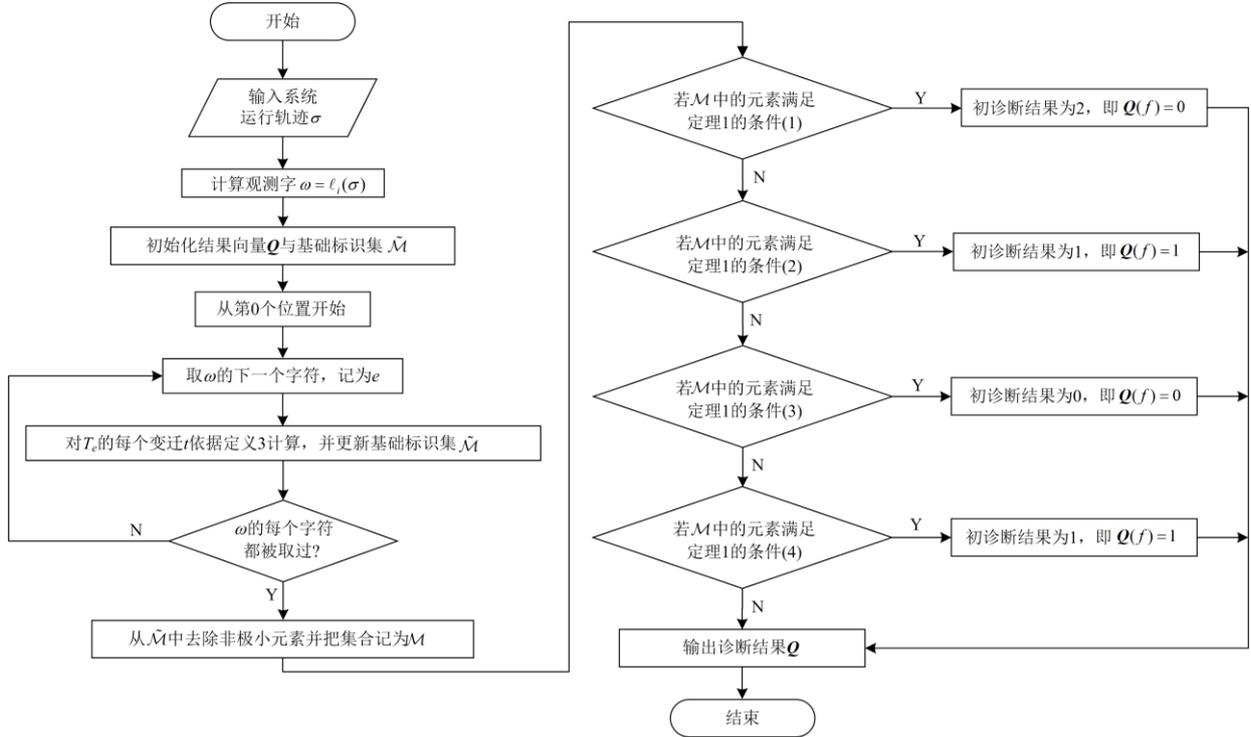


图 3 站点诊断算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the diagnosis algorithm for each site

算法 1: 站点 i 的故障诊断算法

输入: 站点 $\langle N, \mathbf{M}_0, E_i, l_i \rangle$ 和系统运行轨迹 $\sigma \in T^*$

输出: 故障 f_1 至 f_r 的诊断结果, 保存在 r 维的列向量 $\mathbf{Q} \in \{0, 1, 2\}^r$ 中, 即 $\mathbf{Q}(j) = \Phi_i(\omega, f_j)$

(1) 计算观测字 $\omega = l_i(\sigma)$, 初始化 r 维向量 $\mathbf{Q} = \hat{0}^r$, 初始化基础标识集 $\mathcal{M}^0 = \{(\mathbf{M}_0, \hat{0})\}$

(2) 从前至后迭代 ω 中每个字符, 字符记为 e

(3) 初始化集合 $\mathcal{M}^0 = \emptyset$

(4) 对所有变迁

(5) 对所有基础标识和基础向量对 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathcal{M}^0$

(6) 对所有最小触发向量 $\mathbf{v} \in Y_{\min}^i(\mathbf{M}, t)$

(7) 令 $\mathbf{M}' = \mathbf{M} + \mathbf{C}_{u_i} \cdot \mathbf{v} + \mathbf{C}(\cdot, t)$ 且 $\mathbf{y}' = \mathbf{y} + \mathbf{v}$

(8) 令 $\mathcal{M}^0 = \mathcal{M}^0 \cup \{(\mathbf{M}', \mathbf{y}')\}$

(9) 令 $\mathcal{M}^0 = \mathcal{M}^0$

(10) 令 $\mathbf{M} = \{(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathcal{M}^0 \mid \exists (\mathbf{M}', \mathbf{y}') \in \mathcal{M}^0: \mathbf{y}' \leq \mathbf{y}\}$ 用于去除 \mathcal{M}^0 中未包含基础向量(即向量非最小)的元素

(11) 依次取 $j=1, L, r$ 诊断故障 f_j

(12) 若所有 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}) \in \mathbf{M}$ 满足 $\mathbf{y}(f) \geq 1$

(13) 则 $\Phi_i(\omega, f_j) = 2$

(14) 否则, 若存在 $(\mathbf{M}, \mathbf{y}), (\mathbf{M}', \mathbf{y}') \in \mathbf{M}$ 满足 $\mathbf{y}(f) \geq 1$ 和 $\mathbf{y}'(f) = 0$

(15) 则 $\Phi_i(\omega, f_j) = 1$

(16) 否则, 若所有 $(M, y) \in M$ 满足 $y(f) = 0$ 且 $P(M, f)$ 无解

(17) 则 $\Phi_i(\omega, f_j) = 0$

(18) 否则, 若所有 $(M, y) \in M$ 满足 $y(f) = 0$ 且存在 $(M', y') \in M$ 使得 $P(M', f)$ 有解

(19) 则 $\Phi_i(\omega, f_j) = 1$

(20) 令 $Q(j) = \Phi_i(\omega, f_j)$

(21) 输出诊断结果 Q

3.2 诊断协议与协调者诊断算法

诊断协议约定了诊断站点和协调者之间的通信内容和格式, 协调者依据诊断协议接收站点的局部诊断结果, 计算全局诊断结果。诊断协议与协调者可由图 4 描述。

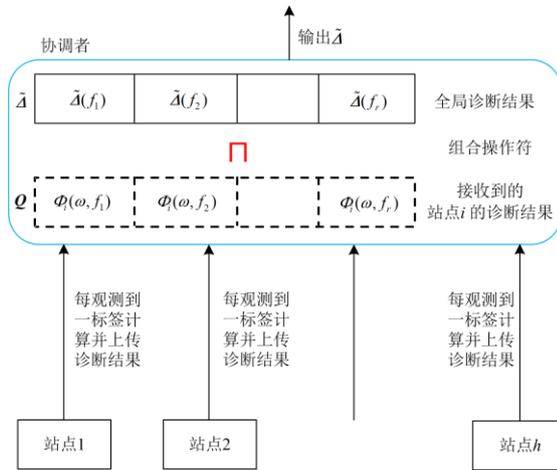


图 4 诊断协议

Fig. 4 Diagnosis protocol

诊断站点 i 持续观测系统运行, 若观测到一个输出标签, 则调用算法 1 计算诊断结果 Q , 并把结果发送给协调者。协调者维护两个向量 Q 和 \bar{A} , 分别表示站点 i 的局部诊断结果和全局诊断结果。协调者收到站点诊断结果 Q 后, 使用定义 4 所示的操作符 'ó' 计算全局诊断结果, 如表 1 所示。

表 1 二元操作符 ó

Table 1 Binary operator ó

ó	0	1	2
0	0	1	2
1	1	1	2
2	2	2	2

定义 4: 二元操作符 ó : $\{0,1,2\} \times \{0,1,2\} \rightarrow \{0,1,2\}$ 依据表 1 计算两个操作数 $a, b \in \{0,1,2\}$, 其计算结果记为 $c = a \text{ ó } b \in \{0,1,2\}$ 。

综上所述, 协调者的诊断流程如算法 2 所示。

算法 2: 协调者诊断算法

输入: 诊断站点 i 的诊断结果 $Q \in \{0,1,2\}^r$

输出: 故障 f_1 至 f_r 的全局诊断结果 $\bar{A} \in \{0,1,2\}^r$

(1) 初始化全局诊断结果 $\bar{A} = \hat{0}^r$

(2) 等待直到接收到局部诊断结果 Q

(3) 对 $j = 1, L, r$

(4) 令 $\bar{A}(j) = \bar{A}(j) \text{ ó } Q(j)$

(5) 输出诊断结果 \bar{A}

(6) 返回行(2)

4 集中式与分散式方法对比

单个诊断站点本质上以调用集中式诊断算法的方式工作, 当多个诊断站点基于分散式架构诊断系统时, 可从分散式诊断结果推理出集中式诊断结果。

命题 2: 给定加标 Petri 网系统 $\langle N, M_0, E, 1 \rangle$ 和运行轨迹 $\sigma \in T^*$, 对于故障 $f \in T_f$, 如果协调者的诊断结果为 $\bar{A}(f) = 2$, 则集中式诊断结果为 $A(f) = 2$, 其中 $\omega = 1(\sigma)$ 。

证明: 依据算法 2, $\bar{A}(f) = 2$ 表明至少存在一个诊断站点的诊断结果为 $\Phi_i(\omega', f) = 2$, 也就是说, 所有序列 $\sigma' \in C_i(\omega')$ 满足条件 $f \in \sigma'$, 命题得证。

命题 3: 给定加标 Petri 网系统 $\langle N, M_0, E, 1 \rangle$ 和运行轨迹 $\sigma \in T^*$, 对于故障 $f \in T_f$, 如果协调者的诊断结果为 $\bar{A}(f) = 0$, 则集中式诊断结果为 $A(f) = 0$, 其中 $\omega = 1(\sigma)$ 。

证明: 依据算法 2, $\bar{A}(f) = 0$ 表明所有诊断站点 i 的诊断结果为 $\Phi_i(\omega', f) = 0$, 即所有序列 $\sigma' \in C_i(\omega')$ 满足条件 $f \notin \sigma'$ 。另一方面, 依据命题 2, $C(\omega) \subseteq C_i(\omega')$ 成立, 其中 $\omega = 1(\sigma)$ 和 $\omega' = 1_i(\sigma)$ 。因此所有序列 $\sigma \in C(\omega)$ 满足 $f \notin \sigma$, 即 $A(f) = 0$ 。

5 仿真

图 5 所示的加标 Petri 网模拟了一个生产螺丝和

螺母的生产线，共分成三部分：左边部分为原材料运输部分，右上部为螺丝生产线，右下部为螺母生产线。

在图 5 所示的生产线中共有五个传感器用于故障诊断，分别记为 A、B、C、D、E，当监测到信号变化时，分别输出符号 a 、 b 、 c 、 d 、 e 。因此，图 5 所示 Petri 网的标签集为 $E = \{a, b, c, d, e\}$ 。同时，由于传感器 A 用来监测变迁 t_1 ，因此变迁 t_1 的标签为传感器 A 的输出符号 a ，即 $T_a = \{t_1\}$ 。由于传

感器 B 用来监测变迁 t_3 和 t_{14} ，因此 t_3 和 t_{14} 的标签为传感器 B 的输出符号 b ，即 $T_b = \{t_3, t_{14}\}$ 。对于传感器 C、D 和 E，其相关变迁的标签表示为 $T_c = \{t_4, t_{11}, t_{18}\}$ 、 $T_d = \{t_5, t_{10}\}$ 和 $T_e = \{t_{19}\}$ 。其他未被监测的事件组成不可观变迁集 $T_u = \{t_2, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{12}, t_{13}, t_{15}, t_{16}, t_{17}, t_{19}, t_{20}, t_{21}, t_{22}, t_{23}, t_{24}, t_{25}\}$ ，包含故障变迁集 $T_f = \{t_{22}, t_{23}, t_{24}, t_{25}\}$ 。初始标识为 $M_0 = 4p_1$ (表示仅库所 p_1 中包含四个托肯)。

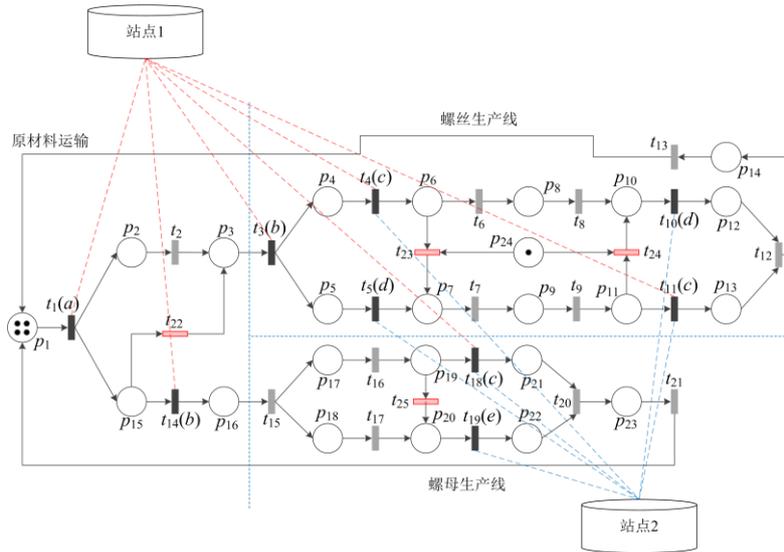


图 5 生产螺丝和螺母的产品线 Petri 网模型

Fig. 5 Petri net model of a production line producing screws and nuts

站点 1 和站点 2 以分散式的方式诊断上述生产系统。其中，站点 1 通过线路与传感器 A、B 和 C 相连，可以监测到标签 a 、 b 和 c 的输出，因此站点 1 的标签集为 $E_1 = \{a, b, c\}$ ，其对应的观测区域为变迁集 $\{t_1, t_3, t_4, t_{11}, t_{14}, t_{18}\}$ ，如图 5 中的站点 1 所示。相应地，站点 2 与传感器 C、D 和 E 相连，可以监测到标签 c 、 d 和 e 的输出，因此其标签集为 $E_2 = \{c,$

$d, e\}$ ，观测区域为变迁集 $\{t_4, t_5, t_{10}, t_{11}, t_{18}, t_{19}\}$ ，如图 5 中的站点 2 所示。假设观测到的输出序列为 $abcdcbee$ ，站点 1、站点 2 和协调者合作使用算法 1 和 2 诊断系统，运算结果如表 2 所示。表 2 中的计算时间在配备有 Intel Core i5-8250U 处理器和 8 G 1600 MHz 内存的笔记本电脑上测得。

表 2 仿真结果

Table 2 Simulation result

$abcdcbee$	诊断站点 1			诊断站点 2			协调者	
	观测	诊断结果	时间/s	观测	诊断结果	时间/s	诊断结果	时间/s
a	a	[1 0 0 0]	0.06				[1 0 0 0]	0.02
b	b	[1 0 1 1]	0.08				[1 0 1 1]	0.01
c	c	[1 1 1 0]	0.15	c	[1 1 0 1]	0.06	[1 1 1 1]	0.03
d				d	[1 1 1 1]	0.07	[1 1 1 1]	0.01
c	c	[1 1 0 0]	0.09	c	[1 1 1 1]	0.06	[1 1 1 1]	0.02
c	c	[1 2 0 0]	0.12	c	[1 1 1 1]	0.14	[1 2 1 1]	0.02
b	b	[1 2 0 1]	0.06				[1 2 1 1]	0.01
e				e	[1 1 1 1]	0.04	[1 2 1 1]	0.01
e				e	[1 1 1 1]	0.05	[1 2 1 1]	0.01

表 2 的第 1 列按顺序列出了输出序列 $abcdccbee$ 的每个标签, 由于 $E_1 \subset E$ 和 $E_2 \subset E$, 站点 1 和 2 分别只能观测到输出序列中的一部分标签, 即站点 1 观测到 a 、 b 和 c , 站点 2 观测到 c 、 d 和 e 。协调者在接收到站点的诊断结果后, 调用算法 2 计算全局诊断结果。如果一个标签(如 c)可被两个站点同时观测到, 则协调者在全部接收到两个站点的诊断结果后, 统计计算时间。

为了对比所提出的方法和其他方法的计算效率, 针对输出序列 $abcdccbee$, 分别使用本文、文献[3]、文献[21]和文献[23]中提出的方法进行故障诊断, 其运行时间如表 3 所示。

表 3 不同方法运行时间对比(以 s 为单位)

Table 3 Comparison of running time of different methods (in seconds)

索引	标签	本文	文献[3]	文献[21]	文献[23]
1	a	0.08	0.08	0.09	0.23
2	b	0.09	0.15	0.19	0.25
3	c	0.18	0.18	0.25	0.36
4	d	0.08	0.26	0.33	0.77
5	c	0.11	0.38	0.52	0.95
6	c	0.16	0.55	0.83	1.33
7	b	0.07	0.71	1.25	1.52
8	e	0.05	0.95	1.75	2.25
9	e	0.06	1.22	2.33	2.79

更形象化的对比结果如图 6 所示, 在相同观测标签数量情况下, 文献[3]、文献[21]和文献[23]中方法的计算时间明显长于本文, 并且随着观测标签数量的增多, 它们的计算时间均呈现逐渐增长的趋势, 而本文提出的方法的计算时间不会增长。

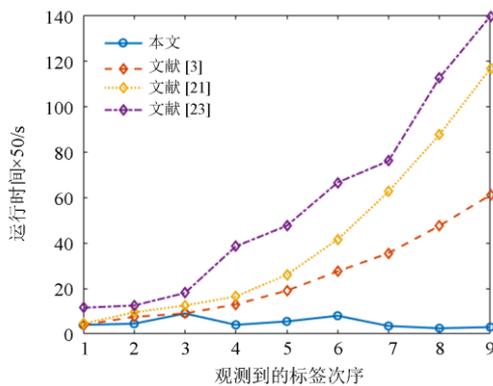


图 6 不同方法运行时间对比

Fig. 6 Comparison of running time of different approaches

6 结语

基于加标 Petri 网数学模型提出分散式架构下

的故障诊断方法, 相对于传统的集中式诊断, 分散式方法包含多个诊断站点, 保证了诊断的及时性和有效性。文中提出的诊断协议比其他分散式协议具有更少的假设限制, 扩展了诊断方法的适用范围。

参考文献

- [1] 魏勇, 崔俊彬, 刘辛彤, 等. 基于改进动态故障树的电力系统广域保护通信系统可靠性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 171-177.
WEI Yong, CUI Junbin, LIU Xintong, et al. A reliability analysis method power system wide area protection communication system based on an improved dynamic fault tree[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 171-177.
- [2] 何宁辉, 朱洪波, 李秀广, 等. 基于贝叶斯网络和假设检验的变压器故障诊断[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 20-27.
HE Ninghui, ZHU Hongbo, LI Xiuguang, et al. Transformer fault diagnosis based on Bayesian network and hypothesis testing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 20-27.
- [3] ZHU G, FENG L, LI Z, et al. An efficient fault diagnosis approach based on integer linear programming for labeled Petri nets[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 66(5): 2393-2398.
- [4] XIA Y, GOU B, XU Y. A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 364-372.
- [5] CASSANDRAS C G, LAFORTUNE S. Introduction to discrete event systems[M]. New York: Springer, 2009.
- [6] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-18.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-18.
- [7] LAFORTUNE S, LIN F, HADJICOSTIS C N. On the history of diagnosability and opacity in discrete event systems[J]. Annual Reviews in Control, 2018, 45(1): 257-266.
- [8] 孙湛冬, 焦娇, 李伟, 等. 基于改进蚁群算法的电力云数据中心任务调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 95-101.
SUN Zhandong, JIAO Jiao, LI Wei, et al. A task scheduling strategy for a power cloud data center based on an improved ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 95-101.
- [9] 方如举, 葛瑜, 孙伟, 等. 基于 WSNs 的智能配电网通信数据传输带宽的优化分配策略[J]. 电力系统保护与

- 控制, 2021, 49(23): 88-95.
- FANG Ruju, GE Yu, SUN Wei, et al. Transmission bandwidth optimal allocation strategy of communication data for a smart distribution grid based on WSNs[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 88-95.
- [10] 胡列翔, 王蕾, 董明枫, 等. 基于改进时间约束 Petri 网的综合能源系统运行优化及可靠性评估[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 123-132, 139.
- HU Liexiang, WANG Lei, DONG Mingfeng, et al. Operation optimization and reliability evaluation of integrated energy system based on improved timing constraint Petri net[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 123-132, 139.
- [11] 刘久富, 刘文良, 周建勇, 等. 改进的部分可观 Petri 网系统在线故障诊断器设计[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(7): 866-872.
- LIU Jiufu, LIU Wenliang, ZHOU Jianyong, et al. An improved design of online fault diagnosis for partially observed Petri net systems[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(7): 866-872.
- [12] 阙蔡雄, 刘富春, 赵锐, 等. 基于 Petri 网诊断器的离散事件系统模式故障的在线诊断[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(7): 1621-1627.
- QUE Caixiong, LIU Fuchun, ZHAO Rui, et al. On-line pattern diagnosis of discrete event systems with Petri net diagnosers[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(7): 1621-1627.
- [13] 杨雯, 刘元琦, 吴小忠, 等. 计及死区故障的 3/2 接线变电站的 Petri 网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 29-37.
- YANG Wen, LIU Yuanqi, WU Xiaozhong, et al. A fault diagnosis method of 3/2 connection substation based on Petri nets with dead-zone fault taken into account[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 29-37.
- [14] SAMPATH M, SENGUPTA R, LAFORTUNE S, et al. Diagnosability of discrete-event systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(9): 1555-1575.
- [15] PROCK J. A new technique for fault detection using Petri nets[J]. Automatica, 1991, 27(2): 239-245.
- [16] GENC S, LAFORTUNE S. Distributed diagnosis of discrete-event systems using Petri nets[C] // Proceedings of International Conference on Application and Theory of Petri Nets, May 27, 2003: 316-336.
- [17] 杨斐然, 于永进. 基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 99-106.
- YANG Feiran, YU Yongjin. Fault diagnosis of distribution network based on time constrained hierarchical fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 99-106.
- [18] 陈伟伟, 吕盼, 纪凤坤, 等. 基于多维度检测与 Petri 网的变电站接地故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 152-159.
- CHEN Weiwei, LÜ Pan, JI Fengkun, et al. Risk assessment of substation grounding fault based on multidimensional detection and Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 152-159.
- [19] GIUA A, SEATZU C. Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions[C] // Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, December 15, 2005, Seville, Spain: 6323-6328.
- [20] CABASINO M P, GIUA A, SEATZU C. Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions[J]. Automatica, 2010, 46(9): 1531-1539.
- [21] CABASINO M P, GIUA A, POCCI M, et al. Discrete event diagnosis using labeled Petri nets: an application to manufacturing systems[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(9): 989-1001.
- [22] DOTOLI M, FANTI M P, MANGINI A M, et al. On-line fault detection in discrete event systems by Petri nets and integer linear programming[J]. Automatica, 2009, 45(11): 2665-2672.
- [23] FANTI M P, MANGINI A M, UKOVICH W. Fault detection by labeled Petri nets in centralized and distributed approaches[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10(2): 392-404.
- [24] WANG Y, ZHU G, WU N. Fault diagnosis of backward conflict-free Petri nets by generalized markings[J]. IEEE Access, 2020, 8(2): 154871-154880.
- [25] CABASINO M P, GIUA A, PAOLI A, et al. Decentralized diagnosis of discrete-event systems using labeled Petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2013, 43(6): 1477-1485.
- [26] CONG X, FANTI M P, MANGINI A M, et al. Decentralized diagnosis by Petri nets and integer linear programming[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(10): 1689-1700.

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2021-07-04

作者简介:

葛瑜(1973—), 女, 硕士, 副教授, 从事控制理论与应用方面的研究; E-mail: gy_73@163.com

王晓静(1976—), 女, 硕士, 副教授, 从事电气控制方面的研究; E-mail: oney139@163.com

朱光辉(1986—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 从事离散事件系统理论与应用、信息安全方面的研究。E-mail: ghzhu@must.edu.mo

(编辑 许威)